

压电风扇激励射流强化凸表面换热研究

陈心竹¹, 张霞¹, 陈莹¹, 武彬彬¹, 李鑫郡^{1,2}

(1.南京师范大学能源与机械工程学院,江苏 南京 210023)

(2.航空飞行器热管理与能量利用工业和信息化部重点实验室,江苏 南京 210016)

[摘要] 利用数值方法,结合动网格技术,针对压电风扇激励射流强制冷却凸表面的流动换热特性进行了研究,重点分析了凸表面的相对曲率和压电风扇排布方式的影响. 研究表明,凸表面相对曲率对流动换热效果具有显著影响,随着凸表面相对曲率的增大,壁面射流的贴壁效应越好,因此表面强化换热效果也越好. 而压电风扇的排布方式主要影响换热表面的温度分布形态,顺向排布时凸表面的壁面温度围绕包络区呈哑铃状分布,而叉向分布式则呈 X 型分布. 总之,顺向排布的压电风扇对于大曲率凸表面的强化换热作用最显著.

[关键词] 压电风扇,凸表面,强化换热,流线,数值模拟

[中图分类号] O643;X703 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2024)01-0018-08

Utilizing a Piezoelectric Fan for Heat Transfer Enhancement on Convex Surfaces

Chen Xinzhu¹, Zhang Xia¹, Chen Ying¹, Wu Binbin¹, Li Xinjun^{1,2}

(1.School of Energy and Mechanical Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

(2.Key Laboratory of Thermal Management and Energy Utilization of Aircraft, Ministry of Industry and Information Technology, Nanjing 210016, China)

Abstract: Using the dynamic mesh technique, a numerical investigation is performed to explore the heat transfer enhancement on convex surfaces by the vibrating piezoelectric fan. The effects of the relative curvature of the convex surfaces and configurations of the piezoelectric fan on the flow and heat transfer characteristics are investigated in detail. The results show that the relative curvature of the convex surface has a significant impact on the flow heat transfer performance. With the relative curvature, the adhesion effect of the wall jet is gradually enhanced, then the heat transfer performance of the convex surfaces is also enhanced. In addition, the configurations of the piezoelectric fan mainly affect the temperature distribution on the surface. A dumbbell-like distribution is shown when the piezoelectric fan is under longitudinal configuration. While under the transverse configuration, it presents an X-shaped distribution. In general, the piezoelectric fan under longitudinal configuration can improve the heat transfer performance of the convex surface with large curvature significantly.

Key words: piezoelectric fan, convex surface, heat transfer enhancement, streamline, simulation

压电风扇是一种依托机械振动原理强化流动换热的主动控制激励装置,主要由压电陶瓷和柔性膜片组成^[1-4]. 其工作原理为通过持续不断地输入电能利用压电材料的逆压电效应将电能转化为机械能,并迫使柔性膜片产生共振,从而激励非定常涡环. 具体来说,通过交流电在致动器内部产生微小的几何膨胀和收缩,从而驱动弹性膜片的前端形成弯曲共振,利用弹性膜片的周期性的弯曲振动,充分扰动周围空气从而形成涡流,聚合成自风扇末端向下运动的准射流,从而改善射流区局部换热特性. 不仅如此,又因其具有功耗低、可靠性高、寿命长、成本低、噪声小、耐腐蚀等特点,因而成为电子冷却应用领域可行的解决方案^[5-6].

近年来国内外学者针对压电风扇激励射流的流动强化换热特性进行了大量研究. 孔岳等^[7]研究了压

收稿日期:2022-07-21.

基金项目:南京航空航天大学科研基地开放课题项目(CEPE2022011)、江苏省高等学校自然科学研究项目(22KJB470019)

通讯作者:李鑫郡,博士,讲师,研究方向:传热传质. E-mail:lixinjun@njnu.edu.cn.

电风扇振动激励风速与几何结构的具体关系,发现柔性膜片长度与压电风扇总长之比存在临界值. Qiu 等^[8]系统研究了压电风扇振动激励对于强化通道内横流局部换热特性的作用. Kimber 等^[9]率先通过热膜实验探究了压电风扇激励射流对加热平面的冷却效果. 主要测试了不同振幅及叶尖至壁面距离等主要因素对综合冷却效果的影响. 结果表明,压电风扇对于强化平面换热具有显著效果. 在此基础上,Chen 等^[10]研究了高雷诺数下压电风扇的流动换热特性. Sufian 等^[11]针对双压电风扇系统所产生的耦合射流强化平面换热进行了研究. 结果表明,双压电风扇系统可以将平面换热能力提高 2.4 倍. 此后,越来越多的研究者开始将研究重点转向压电风扇与扩展表面集成换热系统. Lin^[12]研究了压电风扇对圆柱形扩展表面的强化效果. 研究发现,特定工况下单个风扇即可将圆柱表面整体换热率提高 132%,同时将局部换热率提高 214%. Li 等^[13]利用数值方法研究了压电风扇置于凹腔表面内的流动换热特性. 对比分析了单个风扇以及多风扇的性能,重点阐述了振动相位及间距的影响. Erol 等^[14]利用数值方法研究了压电风扇与鳍柱热沉的组合换热性能. 重点研究了风扇水平排布和垂直排布的影响. 研究发现,水平排布风扇能够提供更好的冷却性能,两种排布的换热性能差异则随着翅片阵列宽度的增加而逐渐减小. 此外,文献[15-18]分别探讨了压电风扇对于波纹板、鱼鳞状表面、翅片热沉及大尺寸热沉的强化换热效果.

综上所述,压电风扇激励对于平面以及绝大多数扩展表面而言,都具有提升其换热性能的潜力. 凸表面作为一种典型的几何结构经常出现在涡轮、机翼、电子设备冷却、油漆滚筒干燥等散热场景中,而且最大热流密度往往出现在凸表面曲率最大的位置^[19]. 目前最常用的凸表面强化换热方法是利用直接射流冲击凸表面顶端破坏其表面热边界层^[20-22],而通过压电风扇高频谐振所激励的准射流冲击冷却凸表面目前研究较少. 因此,本文主要基于 FLUENT 的仿真软件,结合动网格技术数值研究压电风扇在凸表面的换热特性,重点阐释凸表面相对曲率以及叶片振动方向对于流动换热特性的影响.

1 数值研究

1.1 压电风扇模型

本文以某特定结构的压电风扇作为激励装置,其长度 $L_{PF} = 46 \text{ mm}$,宽 $W_{PF} = 8 \text{ mm}$,如图 1 所示. 其一阶振动频率为 67.3 Hz,振幅为 $A_{pp} = 8 \text{ mm}$ ^[23].

1.2 计算模型和边界条件

为研究压电风扇强化凸表面换热性能,建立两类计算模型:压电风扇叉向排布和顺向排布,如图 2 所示.

凸表面长 $L_{CS} = 120 \text{ mm}$,高 $H_{CS} = 48 \text{ mm}$,宽 $W_{CS} = 10, 20, 30, 40$ 和 50 mm (定义 $R_L = 0.5 W_{CS}$). 凸表面模型剖面如图 3 所示,共 10 种计算模型.

在三维非定常流场数值计算中,压电风扇为绝热振动壁面,其运动按特定位移函数设定. 受热凸表面设置为速度无滑移边界及恒热流密度($q = 1600 \text{ W/m}^2$),其余边

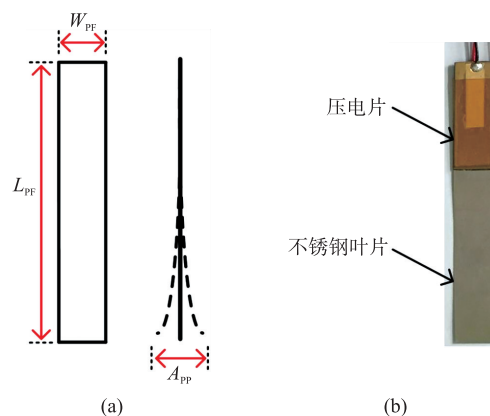


图 1 压电风扇结构示意图

Fig. 1 Schematic geometry of the piezoelectric fan

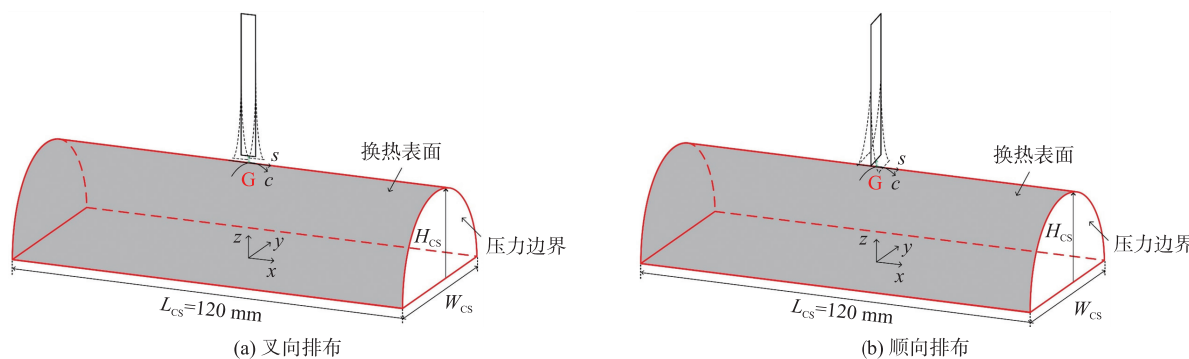


图 2 三维计算模型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of 3D computational models

界均为压力边界。

2 计算方法

2.1 控制方法及湍流模型

鉴于压电风扇周期性振动所激励产生的空气流动为低速不可压非稳态流动,因此采用非稳态不可压缩 Navier-Stokes 方程进行模拟^[23]。压电风扇柔性膜片作为振动壁面,其周期性运动轨迹方程函数基于相应的测振试验结果为

$$y(x, t) = Y(x) \sin(2\pi ft), \quad (1)$$

$$Y(x) = p_1 x^4 + p_2 x^3 + p_3 x^2 + p_4 x + p_5. \quad (2)$$

式(1)中, $Y(x)$ 表示压电风扇某个位置的峰值位移, x 表示叶片到固定端的距离, t 表示压电风扇运行时间, f 为其一阶振动频率。式(2)中的相关系数: $p_1 = -1.856 \times 10^{-7}$, $p_2 = 2.347 \times 10^{-4}$, $p_3 = -7.25 \times 10^{-3}$, $p_4 = 6.281 \times 10^{-2}$, $p_5 = -5.124 \times 10^{-2}$ 。

采用 Fluent 软件进行数值模拟,压电风扇的振动根据时间-位移函数,由用户自定义函数编写实现。流体物性参数如黏度、导热系数等均视为特征温度下的流体参数,其特征温度取

$$T_f = \frac{T_a + T_w}{2}. \quad (3)$$

式中, T_a 为流体环境温度, T_w 为壁面平均温度。

湍流模型选择 SST K-W 双方程模型,因为在处理此类问题时该模型数值计算结果的最终残差值最小^[12,24]。使用 SIMPLEC 算法求解压力速度耦合方程,采用离散非稳态隐式求解器进行计算,其中动量、能量等参数采用二阶迎风格式进行离散化处理^[25]。

2.2 数据处理

为了研究压电风扇激励射流对于凸表面的平均强化换热效果,将对流换热过程稳定后风扇在一个振动周期内受热面的瞬时温度进行积分,得到受热面的时均温度,进而获得其时均对流换热系数,

$$\bar{T}_w = \frac{1}{t} \left(\int_{\tau}^{\tau+t} T_w dt \right), \quad (4)$$

$$h = \frac{q}{(T_w - T_a)}. \quad (5)$$

式(4)和式(5)中, t 代表完整振动周期, τ 代表任意时刻, T_w 代表受热面瞬时温度, T_a 为凸表面上方区域空气平均温度。

同时,为了研究凸表面沿展向和弦向的平均对流传热系数分布规律,引入沿翼展方向(S 方向)平均对流传热系数和沿弦向(C 方向)平均对流传热系数。

$$h_{\text{ave}} = \frac{\int_{-L/2}^{L/2} h(S, C) dC}{L}, \quad L = 1A_{\text{PP}} \text{ 或 } 2A_{\text{PP}}, \quad (6)$$

$$h_{\text{ave}} = \frac{\int_{-L/2}^{L/2} h(S, C) dS}{L}, \quad L = 1A_{\text{PP}} \text{ 或 } 2A_{\text{PP}}. \quad (7)$$

式中, L 为积分的宽度,此处 L 为 A_{PP} 或 W_{PF} 。

3 结果与分析

3.1 时均换热分析

图 4 为一个周期内恒热流密度凸表面时均对流传热系数分布云图。图中黑色虚线框代表压电风扇尖

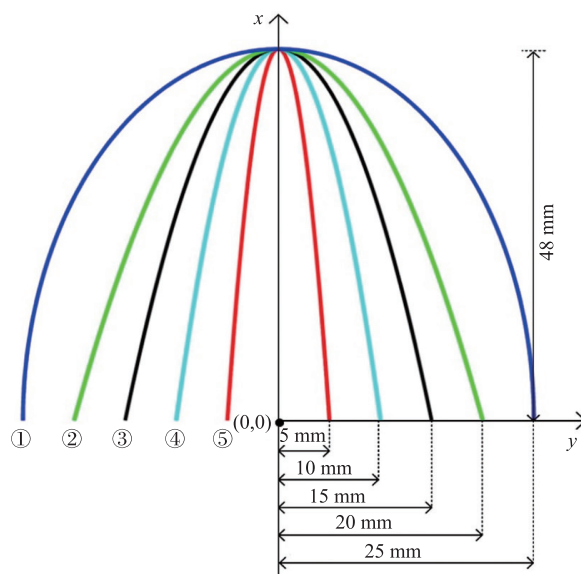
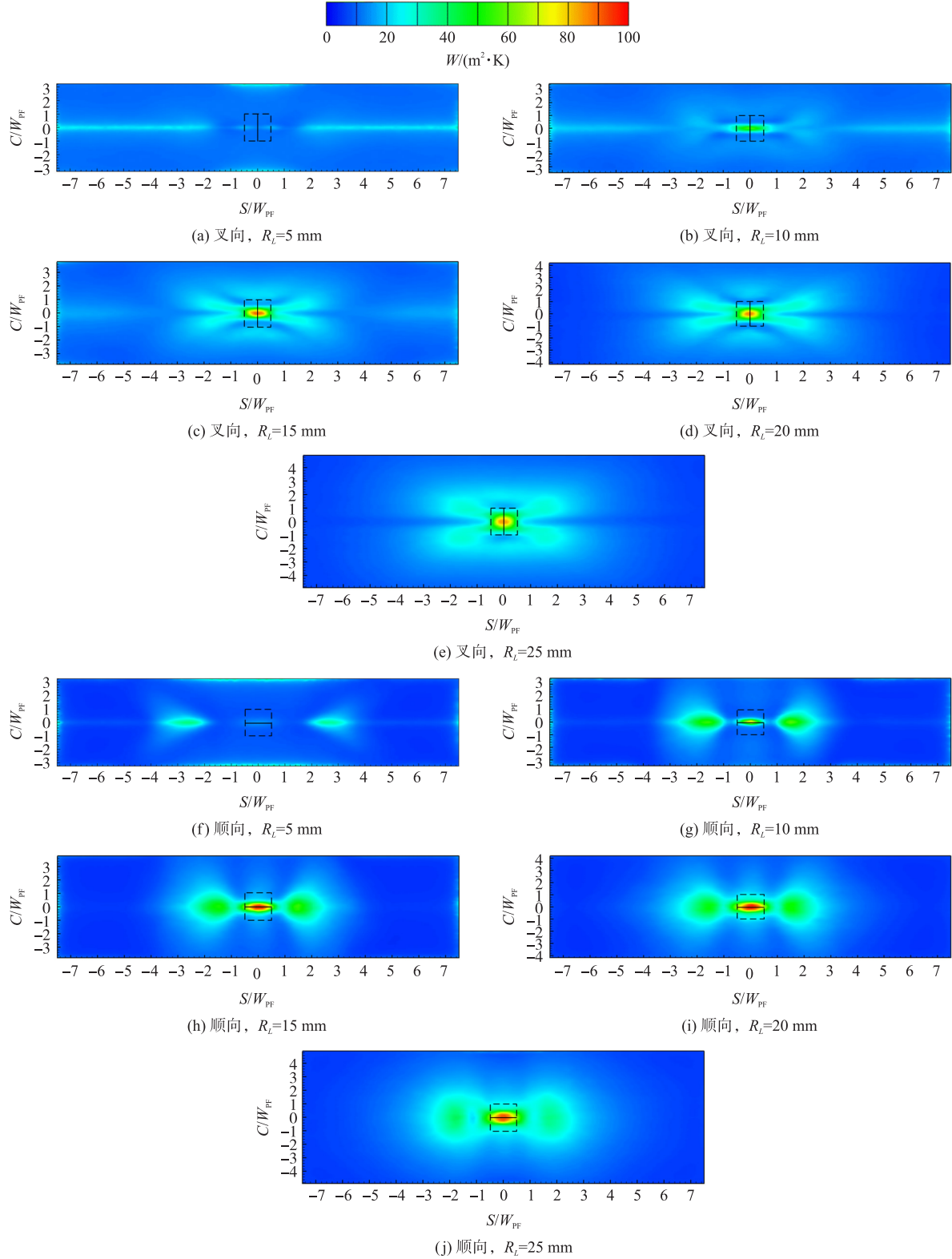


图 3 凸表面剖面

Fig. 3 Convex surfaces profiles

端振动包络区,黑色实线为叶片尖端平衡位置。

由图 4(a)–图 4(e)可知,当压电风扇叉向排布时,随着凸表面曲率半径的增大,在叶片振动包络区附近凸表面对流换热强化区域的范围逐渐增大,强化换热区域整体呈 X 型分布。此外强化换热最强区域位于风扇包络区内,且核心区域的换热系数随曲率半径的增加逐渐增加。从图 4(f)–图 4(j)可知,压电风扇



注:“ C/W_{PF} ”“ S/W_{PF} ”分别为“弦向坐标与压电风扇宽度的比”“展向坐标与压电风扇宽度的比”,下同。

图 4 凸表面时均对流换热系数分布

Fig. 4 The distribution of time-averaged convective heat transfer coefficient on convex surfaces

顺向布置时,凸表面的对流换热系数的分布与叉向分布时明显不同.此时,随着凸表面曲率的增加,对流换热系数逐渐形成哑铃状分布,且核心区域内的换热效果略优于叉向排布时的情况.

图5为单个压电风扇叉向振动时分别沿展向(S 方向)和弦向(C 方向)以一定宽度($1A_{pp}$ 或 $1W_{pf}$)进行积分计算得到的平均对流换热系数分布情况.图5(a)和5(c)中黑色实线代表压电风扇的侧缘位置,图5(b)和图5(d)中黑色虚线代表压电风扇振动的最大偏移位置.

对比图5(a)和图5(c)可知,两种风扇排布方式下 h_{ave} 峰值均出现在振动包络区内,而一旦越过风扇振动包络区后,积分平均对流换热系数(h_{ave})则迅速降低.整体来说,沿展向上顺向排布比叉向排布的换热效果更好.同时,相对曲率越大,积分平均对流换热系数(h_{ave})峰值越大.对比图5(b)和图5(d)可知,在弦向上,风扇排布对于换热效果影响不大.

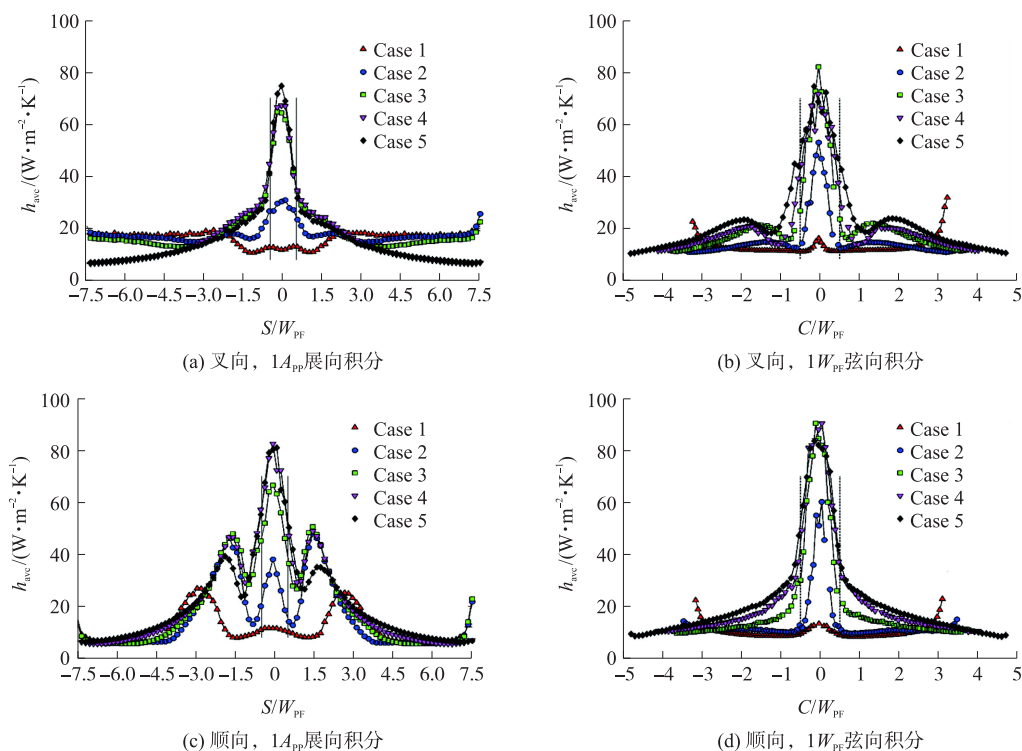


图5 不同凸表面的积分平均对流换热系数分布情况

Fig. 5 Laterally-averaged convection heat transfer coefficients for different convex surfaces

3.2 流场特征分析

为了进一步揭示压电风扇周期性谐振激励射流在凸表面的流动与换热机理,本节将分析其时均流场和瞬时流场特征.

图6为一个振动周期内,凸表面上方区域 $x-y$ 平面和 $z-y$ 平面平均速度分布情况.对比图6(a)和图6(g)可知,无论是顺向还是叉向排布,当 $R_L=5\text{ mm}$ 时,由风扇振动产生自顶端向下方垂直射流在冲击凸表面后迅速脱离表面,产生明显的流动分离现象,因此强迫对流对于凸表面的强化换热作用并不显著.从图6(b)、图6(c)和图6(h)、图6(i)可知,随着凸表面曲率半径逐渐增加,壁面射流的贴壁性逐渐增强,因而对流换热效果逐渐增强.在 $z-y$ 平面上这一流动特征同样满足.

图7和图8给出了压电风扇在不同曲率凸表面上运动时叶片周围的瞬时流线(使用速度大小进行染色)以及受热壁面的瞬时温度分布情况.

总之,自叶片底端延伸出的流线主要沿风扇两侧由上至下呈螺旋状分布,在撞击凸表面后流线分布大致沿壁面两侧对称分布.对比图7(a)~图7(c)和图8(a)~图8(c)不同凸表面相对曲率下叶片运动至中间位置时的流线演变过程以及受热壁面的瞬时温度分布情况可以发现,风扇叉向排布时,流线沿曲面斜向运动,进而导致X型温度分布,而当风扇顺向排布时,流线则主要沿表面两侧中心位置流出表面.此外,还可以看出随着曲率的增加,壁面温度逐渐降低,且叶片顺向布置时,压电风扇包络区附近的凸表面温度明显低于叉向排布的工况,因此局部换热效果更好.

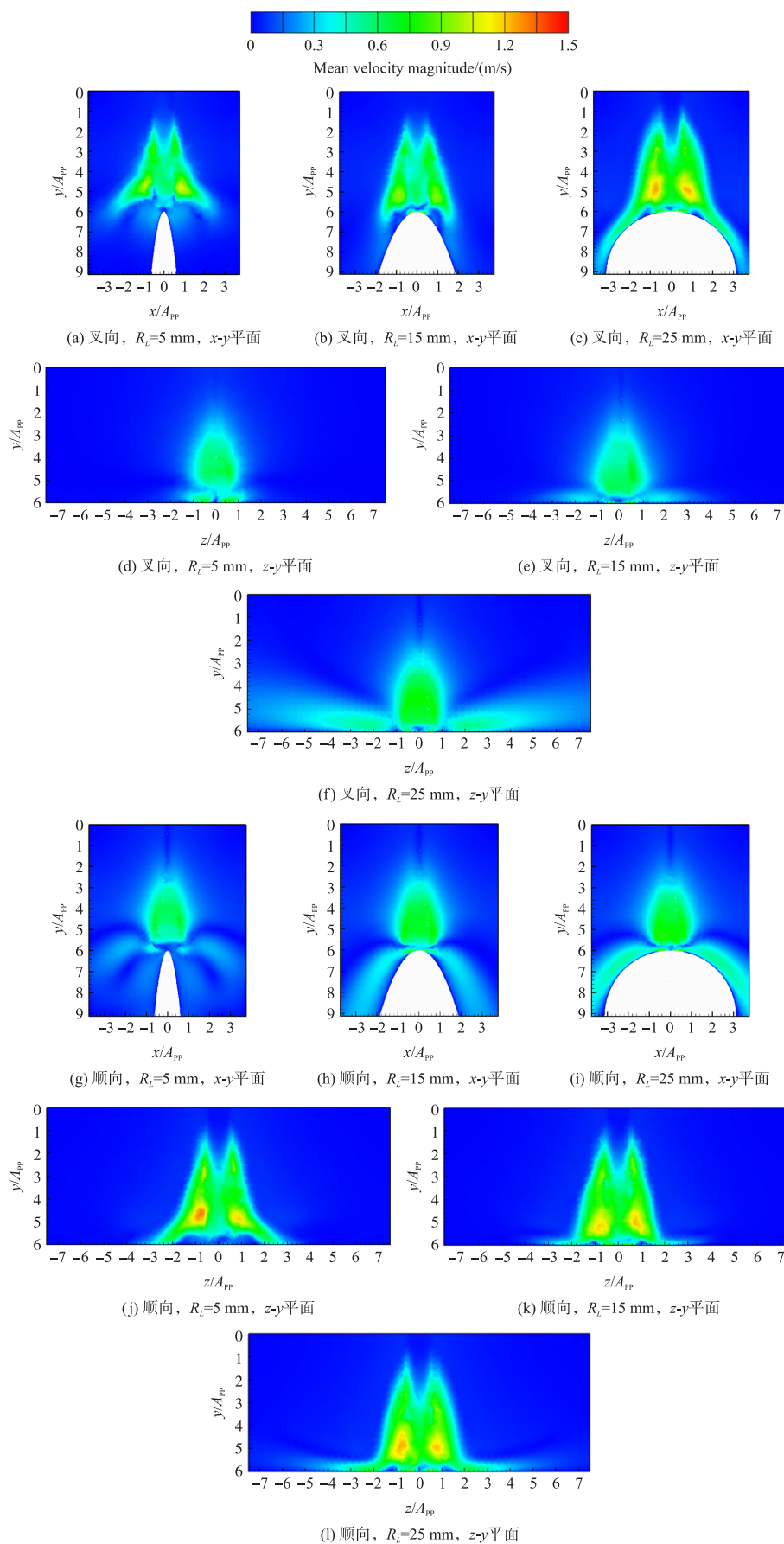


图 6 中心截面的时均速度图情况

Fig. 6 Time-averaged velocity contours in central sections

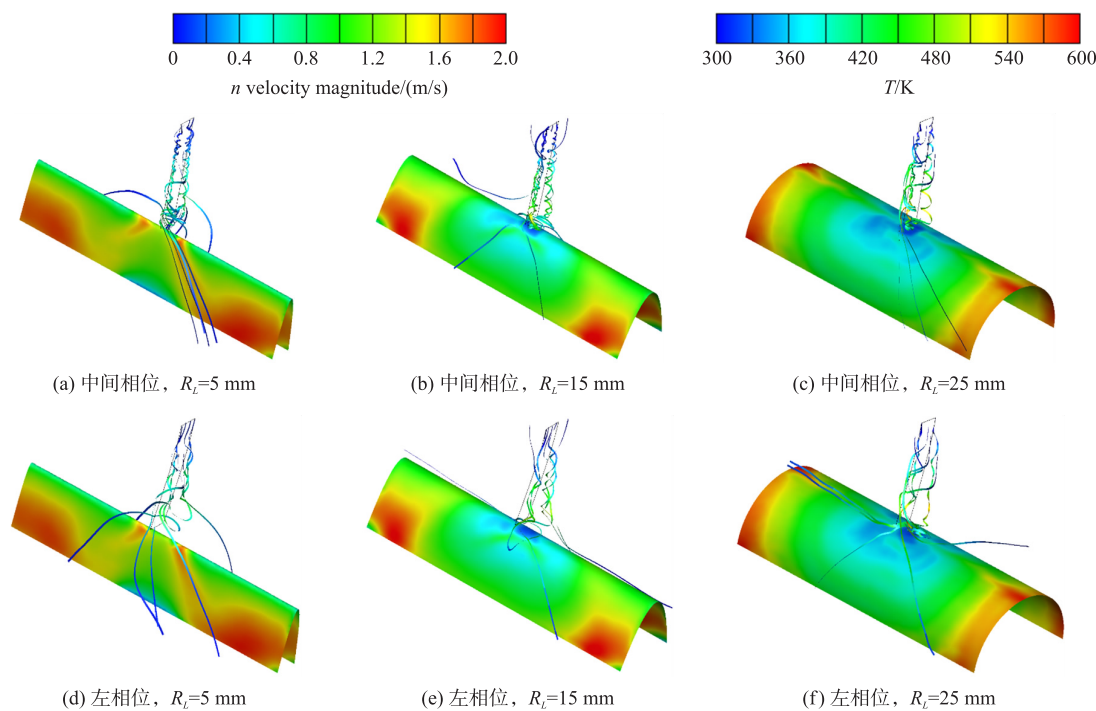


图 7 瞬时温度分布及流线(叉向排布)

Fig. 7 Instantaneous temperature maps and streamlines under transverse configuration

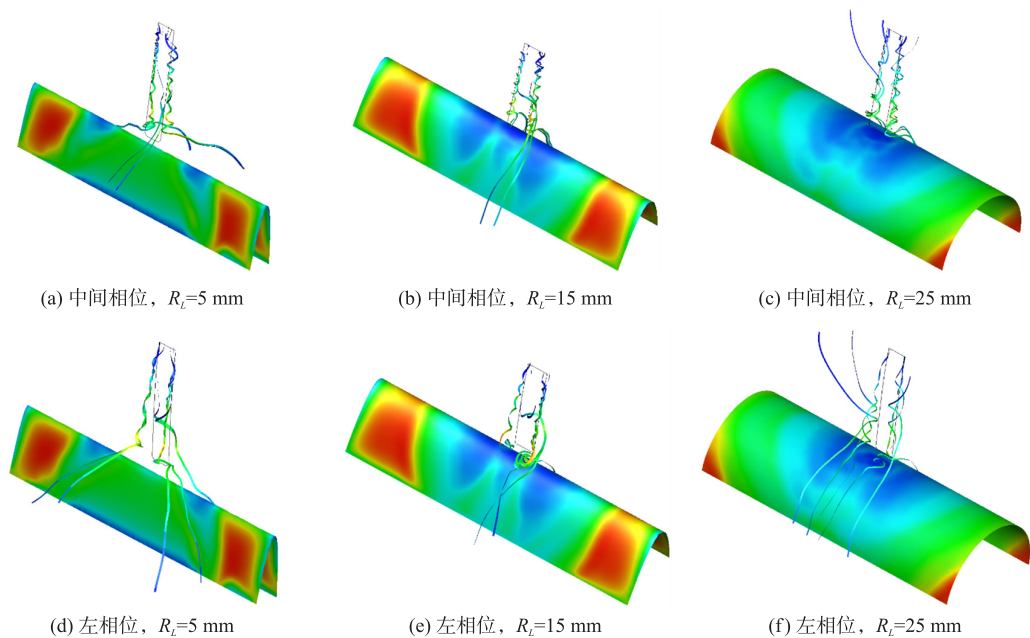


图 8 瞬时温度分布及流线(顺向排布)

Fig. 8 Instantaneous temperature maps and streamlines under longitudinal configuration

4 结论

针对压电风扇冷却凸表面的流动换热特征进行了数值研究,在建立压电风扇冷却凸表面数值模型的基础上,运用动网格技术模拟压电风扇的往复周期性振动. 重点分析了压电风扇凸表面相对曲率和风扇安装方向对于强化换热的影响,研究表明:

(1)压电风扇激励射流对于强化凸表面换热具有一定的作用. 并且随着凸表面相对曲率的增大,在叶片摆动范围内换热得到逐步强化. 相对曲率越大,积分平均对流换热系数(h_{ave})峰值越大. 因为随着曲率的增大,在风扇振动包络区内气流扰动越强.

(2)风扇排布方式对换热强化的影响主要体现在振动方向上. 当叶片叉向布置时,形成沿翼方向(S

方向)延伸的X型强化换热区域。当叶片顺向布置时,形成沿翼方向(S方向)延伸的哑铃状强化换热区域。整体而言,压电风扇顺向布置时振动包络区内的局部换热效果更好。

[参考文献](References)

- [1] MAASPURO M. Piezoelectric oscillating cantilever fan for thermal management of electronics and LEDs – A review[J]. *Microelectronics Reliability*, 2016, 63: 342–353.
- [2] HALES A, JIANG X. A review of piezoelectric fans for low energy cooling of power electronics[J]. *Applied Energy*, 2018, 215: 321–337.
- [3] 郭修宇,王海峰,李海宁,等. 基于有限元的压电风扇建模与仿真分析[J]. *青岛大学学报(工程技术版)*, 2019, 34(4): 44–47.
- [4] ZHONG X L, CHAN K C, FU S C, et al. Enhancement of piezoelectric fan cooling by geometrical arrangements[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2022, 199: 123479.
- [5] 谭蕾,谭晓茗,张靖周. 压电风扇激励非定常流动和换热特性数值研究[J]. *航空学报*, 2013, 34(6): 1277–1284.
- [6] CHEN Y Y, LI J X, WANG Z W, et al. Unsteady flow characteristics of an oscillating piezoelectric fan blade at high Reynolds numbers[J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(20): 9510.
- [7] 孔岳,李敏,吴蒙蒙. 压电风扇非定常流场速度分布的数值研究[J]. *工程力学*, 2016, 33(1): 209–216.
- [8] QIU Y L, WU C J, CHEN W F. Local heat transfer enhancement induced by a piezoelectric fan in a channel with axial flow[J]. *Journal of Zhejiang University SCIENCE A (Applied Physics & Engineering)*, 2020, 21: 1008–1022.
- [9] KIMBER M, GARIMELLA S V, RAMAN A. Local heat transfer coefficients induced by piezoelectrically actuated vibrating cantilevers[J]. *Journal of Heat Transfer*, 2007, 129: 1168–1176.
- [10] CHEN Y Y, DING H, WANG Z W, et al. Experimental PIV investigation of the PZT fans array coupling effect at high Reynolds numbers[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, 2108: 012010.
- [11] SUFIAN S F, FAIRUZ Z M, ZUBAIR M, et al. Thermal analysis of dual piezoelectric fans for cooling multi-LED packages[J]. *Microelectronics Reliability*, 2014, 54: 1534–1543.
- [12] LIN C N. Enhanced heat transfer performance of cylindrical surface by piezoelectric fan under forced convection conditions[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2013, 60: 296–308.
- [13] LI X J, CHEN W W, LU S H. Characterization of the thermal performance of multi piezoelectric fans for cooling a semi-cylindrical concave surface[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2021, 208: 106672.
- [14] EROL U, ÖZGÜR E. Thermal performance of horizontally/vertically oriented piezoelectric fans in varying fin-array width[J]. *Heat Transfer Engineering*, 2021, 42(15): 1286–1302.
- [15] HU J Y, JING C J. Investigation on thermal-hydraulic performance of the absorber plate using a piezoelectric fan in the solar air heater[J]. *AIP Advances*, 2019, 9: 065209.
- [16] EBRAHIMI N D, JU Y S. Heat transfer augmentation using scale-roughened surfaces for low-reynolds number flows generated by piezoelectric fans[C]//2019 18th IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems(ITherm). Las Vegas, NV, USA: IEEE, 2019: 1212–1219.
- [17] HSU H P, CHENG C, LI H Y, et al. Thermal and fluid characteristics of single fin heat sink with piezoelectric cooling fan[J]. *Journal of Flow Visualization and Image Processing*, 2019, 26(1): 57–78.
- [18] SHYU J C, JHENG S K. Cooling performance and characteristics of metal piezoelectric fans in a heat sink-equipped handheld projector[J]. *Microelectronics Reliability*, 2018, 84: 75–87.
- [19] ABRAHAM S, VEDULA R P. Heat transfer distribution on a cylindrical convex surface due to obliquely impinging row of circular jets[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, 137: 751–764.
- [20] BOLEK A, BAYRAKTAR S. Flow and heat transfer investigation of a circular jet issuing on different types of surfaces[J]. *Südhana*, 2019, 44(12): 242.
- [21] TALAPATI R J, KATTI V V, HIREMATH N S. Local heat transfer characteristics of synthetic air jet impinging on a smooth convex surface[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2021, 170(6): 107143.
- [22] ABRAHAM S, VEDULA R P. Effectiveness distribution measurements for a row of heated circular jets impinging on a cylindrical convex surface at different inclinations[J]. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2018, 69: 210–223.
- [23] LI X J, TAN X M, ZHANG J Z, et al. Utilizing piezoelectric fan for heat transfer enhancement on corrugated surfaces[J]. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2022, 29: 101219.
- [24] FAIRUZ Z M, SUFIAN S F, ABDULLAH M Z, et al. Effect of piezoelectric fan mode shape on the heat transfer characteristics[J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2014, 52: 140–151.
- [25] TAN L, ZHANG J Z, TAN X M. Numerical investigation of convective heat transfer on a vertical surface due to resonating cantilever beam[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2014, 80(1): 93–107.

[责任编辑:陈 庆]